

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 19820130154230

UDC_____

厦门大学

博士学位论文

Skyrme Hartree-Fock理论对原子核奇偶差及 气泡核结构的研究

Research on nuclear odd-even difference and the structure of
bubble nuclei based on Skyrme Hartree-Fock theory

于 坤

指导教师姓名: 周 先 荣 教授

专 业 名 称: 理 论 物 理

论文提交日期: 2016 年 月

论文答辩时间: 2016 年 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2016 年 月

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名): 于坤

2016年5月12日

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：于坤

2016年5月12日

厦门大学博硕士论文摘要库

摘要

本文基于Skyrme Hartree-Fock (SHF)理论研究了原子核的奇偶差及气泡核的性质。关于原子核的奇偶差，我们着重讨论了SHF中奇时项对原子核奇偶差的影响。对气泡核结构的研究中，我们分别讨论了张量力和对力对气泡核结构的影响。

作为本文的研究工作之一，我们则采用SHF+BCS模型研究了奇时项效应对半幻数球形核Ca, Ni和Sn同位素链结合能奇偶质量差的影响。计算中，我们使用了两种对相互作用，一种是表面型 δ 相互作用（IS），另一种是同位旋依赖型对相互作用（IS+IV）。研究中我们也使用了除SLy4 Skyrme相互作用外的SLy6和SkM*相互作用。其中，我们主要计算了半幻数球形核的分离能（ S_{1n} 和 S_{2n} ）及由三点公式得到的能隙 Δ_n^3 。首先，结果表明使用同位旋依赖对相互作用（IS+IV）的计算比使用表面型对相互作用（IS）的计算更能够给出与实验符合的Sn同位素单中子分离能 S_{1n} 。相反，奇时项效应并没有引起Ca, Ni和Sn同位素链双中子分离能 S_{2n} 有明显改变。另外，我们还采用SLy4, SLy6以及SkM*相互作用分析了奇时项效应对能隙影响的相互作用依赖性。结果发现，使用SLy6相互作用能够给出与SLy4情况下几乎相同的结果，相反，在SkM*相互作用情况下，奇时项对能隙 $\Delta_n^{(3)}$ 的效应却比SLy4和SLy6情况下小得多。总之，尽管奇时项效应对能隙 Δ_n^3 的影响较小，但是采用SLy4和SLy6相互作用的计算，还是能够得到与实验值更加符合的结果。此外，由于奇时项中的 \mathcal{H}_{fin}^{odd} 项可能引起某些有限和无限核系统的自旋不稳定性。因此，我们采用SLy4相互作用研究了 \mathcal{H}_{fin}^{odd} 项效应对Ca, Ni和Sn同位素链能隙的影响。然而，计算表明，我们的研究中并不存在明显的自旋不稳定问题。

本文的另一项研究工作则是在SHF+BCS+Lipkin-Nogami (LN) 模型下，研究了对关联相互作用及张量力效应对气泡核结构形成的影响。首先，我们分析了气泡核中最有可能存在气泡结构的两个核。一个是可能存在质子气泡结构的 ^{46}Ar 核，另一个则是可能存在中子气泡结构的 ^{22}O 核。结果发现对关联和张量力效应都倾向于削弱气泡结构的形成。在不考虑对关联和张量力效应的计算中， ^{46}Ar 的质子密度分布和 ^{22}O 的中子密度分布也都表现出了气泡现象。另外，我们也采用SLy5 + T相互作用研究了张量力对 $^{29-47}\text{Cl}$ 同位素气泡结构的影响。我们使用同样的方法计算了Cl同位素的基态质子和中子密度分布、质子 $2s_{1/2}$ 态的占据几率 v^2 以及单质子能 ε 。计算表明在SLy5 + T张量力相互作用下， $^{39-47}\text{Cl}$ 出现的气泡结构现象是由单质子态 $2s_{1/2}$ 与 $1d_{3/2}$ （ $s-d$ 态反转）发生反转引起的。同时发现，质子 $2s_{1/2}$ 态占据几率 v^2 的降低是由张量力的相干效应及较重Cl同位素出现的扁椭形变引起的。

关键词： Skyrme-Hartree-Fock方法，奇时项，同位旋依赖对相互作用，奇偶

差, S_{1n} , S_{2n} , Δ_n^3 , 张量力, 气泡核, $s-d$ 态反转

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Nuclear odd-even difference and the structure of bubble nuclei has been studied based on Skyrme Hartree-Fock (SHF) theory. concerning nuclear odd-even difference, we investigate the effect of time-odd term in SHF theory. In the study of the structure of bubble nuclei, we mainly discuss the effect of tensor force and pairing force on the structure of bubble nuclei, respectively.

As one of the research work in this thesis, the SHF+BCS model has been adopted to study the time-odd term effects on odd-even mass differences properties of ground state in semi-magic spherical nuclei, such as Ca, Ni, and Sn isotopic chains. In the calculations, two types of pairing interactions are adopted. One is the surface-type δ interaction (IS pairing), the other is the isospin dependent contact interaction (IS+IV pairing). Except for SLy4 Skyrme interaction, we have also adopted the Skyrme interactions SLy6 and SkM* in this study. In our calculation, we obtain the separation energies (S_{1n} and S_{2n}) as well as the energy gaps obtained by three-point formalism of semi-magic spherical nuclei. Firstly, in Sn isotopic chain, the results indicate that the calculation with the IS+IV type of pairing interaction reproduces well the systematic trend of experimental one-neutron separation energies S_{1n} compared with those of IS type pairing interaction. In constant, as for two-neutrons separation energies (S_{2n}) of Ca, Ni and Sn isotopic chains, the differences between the calculations with and without inclusion of the time-odd term effects are rather small. In addition, the interaction dependence of the time-odd term effects on energy gaps was also studied in the calculations with SLy4, SLy6 as well as SkM* Skyrme interactions. The calculation shows that the calculation with SLy6 interaction could give almost the similar results as those of SLy4 interaction, but the SkM* interaction gives much smaller interaction dependent effect than those of SLy4 and SLy6 interactions. In short, we found that the effects of time-odd terms on pairing gaps of semi-magic spherical nuclei are in general small, while one achieves better agreement with experimental Δ_n^3 when adopting SLy4 and SLy6 interactions, respectively. Furthermore, among the time-odd terms, it was claimed that the \mathcal{H}_{fin}^{odd} term could cause the spin instability in some special cases of finite and infinite systems. Therefore, we investigate the effect of \mathcal{H}_{fin}^{odd} term by calculating the pairing gaps (Δ_n^3) of Ca, Ni as well as Sn isotopic chains within SLy4 interaction. However, the results indicate that there is no serious spin instability problems in our present studies.

Beside this, another research work in this thesis is that we investigate the pairing and tensor effects on the formation of bubble structure based on SHF+BCS+Lipkin-Nogami (LN) model. On one hand, we choose two candidates bubble nuclei as examples. The first one is ^{46}Ar , which was seen as a proton bubble nucleus, while, the second one is ^{22}O , which was seen as a neutron bubble nucleus. The calculation shows that both the

pairing and the tensor correlation tend to weaken the clear bubble structure of these two nuclei. Then without the inclusion of the pairing and the tensor correlation, the calculations give a clear bubble phenomenon in proton (neutron) density distributions of ^{46}Ar (^{22}O). In addition, we have also investigated the effects of tensor force on the bubble structure in $^{29-47}\text{Cl}$ isotopes with $\text{SLy5} + T$ interaction. In our study, we calculate the proton and neutron density distributions, the proton occupation probability (v^2) of the $2s_{1/2}$ state, and the proton single-particle energies ε in those Cl isotopes with SHF+BCS+LN model. From the calculation, we found that the $\text{SLy5} + T$ tensor interaction supports the bubble structure of neutron-rich Cl isotopes ($^{39-47}\text{Cl}$) due to the inversion of $\pi 2s_{1/2}$ and $\pi 1d_{3/2}$ single-particle states. Then, it was found that the occupation probability v^2 of the $2s_{1/2}$ state is hindered by a coherent effect of the tensor force and oblate deformation in heavier Cl isotopes, even if the pairing correlation exists.

Key Words: Skyrme-Hartree-Fock model, Time-odd term, Isospin-dependent pairing interaction, Odd-even-staggering, S_{1n} , S_{2n} , Δ_n^3 , Tensor force, Bubble nuclei, s - d inversion

目 录

摘要	I
Abstract	III
第一章 引言	1
1.1 当前核物理研究前沿简介	1
1.2 本文研究动机及结构	7
第二章 Skyrme-Hartree-Fock 方法介绍	11
2.1 Hartree-Fock 方法	11
2.1.1 Skyrme能量密度泛函	13
2.1.2 Skyrme 相互作用中的“奇时项”	14
2.2 对相互作用	15
2.2.1 对力的处理方法-BCS(Bardeen-Cooper-Schrieffer)方法	17
2.3 Skyrme Hartree-Fock 中的张量力	20
第三章 奇时项对半幻核奇偶质量差的影响	25
3.1 引言	25
3.2 $Z = 50$ 原子核单中子分离能的演化和分析	26
3.3 $Z=20$ 和 28 原子核同位素链的单中子分离能的计算	28
3.4 $Z = 20$ 、 28 和 50 原子核同位素链的双中子分离能的计算	29
3.5 $Z = 20$ 、 28 和 50 原子核能隙的计算	32
3.5.1 \mathcal{H}_{fin}^{odd} 项效应的影响	35

3.6 本章小结	38
第四章 对力和张量力对气泡结构的影响.....	41
4.1 引言	41
4.2 对力和张量力作用在 ^{46}Ar 和 ^{22}O 原子核气泡结构中的效应	43
4.3 张量力效应对丰中子Cl同位素气泡结构形成的影响	46
4.4 本章小结	51
第五章 总结与展望	53
附录 A Skyrme Hartree-Fock密度泛函理论.....	57
A.1 Skyrme Hartree-Fock方法	57
A.2 Skyrme势能密度项参数	58
附录 B Skyrme相互作用平均场中的奇时项	60
附录 C 二次量子化.....	62
C.1 费米子算符	62
C.2 多体哈密顿量	62
附录 D Lipkin-Nogami方法	64
参考文献	65
博士期间发表的文章.....	79
致谢	80

Contents

Abstract	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction on Current Nuclear Physics Research	1
1.2 The Purpose and Structure of Research	7
Chapter 2 Introduction on Skyrme Hartree-Fock Method	11
2.1 Hartree-Fock Method	11
2.1.1 Skyrme Energy Density Functional	13
2.1.2 Time-odd Term of Skyrme Interaction	14
2.2 Pairing Interaction	15
2.2.1 Pairing Solution-BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) Method	17
2.3 Tensor Force of Skyrme Hartree-Fock	20
Chapter 3 Effect of Time-odd Term on Odd-even Mass Differences of Semi-magic Nuclei	25
3.1 Introduction	25
3.2 The Evolution and Analysis of One-neutron Separation Energies for Z=50 Isotopes	26
3.3 The Calculation of One-neutron Separation Energies for Z=20 and 28 Isotopic Chains	28
3.4 The Calculation of Two-neutron Separation Energies for Z=20, 28, and 50 Isotopic Chains	29
3.5 The Calculation of Energy Gaps for Z=20, 28, and 50 Isotopes	32
3.5.1 The Effect of H_{fin}^{odd} Term	35
3.6 Summary	38
Chapter 4 The Effect of Tensor Force and Pairing Force on the	

Structure of Bubble Nuclei	41
4.1 Introduction	41
4.2 The Effect of Tensor and Pairing Force In ^{46}Ar and ^{22}O Bubble Nucleus	43
4.3 The Effect of Tensor Force on Formation of Bubble Structure In Neutron-rich Cl Isotopes.....	46
4.5 Summary	51
Chapter 5 Summary and Outlook.....	53
Appendix A Skyrme Hartree-Fock Energy Density Functional.....	57
A.1 Skyrme Hartree-Fock Method	57
A.2 The Parameters of Skyrme Energy Term	58
Appendix B The Time-odd Term of Skyrme Interaction.....	60
Appendix C The Second Quantum	62
C.1 Fermi Operator	62
C.2 Many-body Hamiltonian	62
Appendix D Lipkin-Nogami Method.....	64
References	65
Publications.....	79
Acknowledgements.....	80

第一章 引言

原子作为“有核模型”被人们所证明，源自于1911年Rutherford的 α 粒子对原子的散射实验。而原子核的构成问题，也随着Chadwick在1932年发现中子后，被Heisenberg等人提出的原子核是由质子跟中子组成所解答 [1]。一百多年后的今天，我们已经清楚地知道原子核是由质子跟中子在强相互作用下所组成的量子多体系统。原子的宏观现象依赖于原子的微观结构，原子核的微观基础又决定了原子核的宏观现象。因此，原子核结构的研究对原子核的描述和解释有着十分重要的意义。作为非单一核子构成的原子核，人们一般从两个方面来对其研究，一方面是构成原子核的粒子间相互作用，另一方面是多核子体系问题。然而，在原子核结构的研究中也遇到了一些问题：核力的性质并不十分清楚，目前的理论研究中，对核力的选择也只是一些近似的拟合实验值的核力公式。量子力学应用于强相互作用且数目不多的体系是有困难。

到目前为止，核结构物理的研究工作主要分为理论研究和实验研究两个方面。在理论研究方面，人们可以通过构建模型来预测和解释原子核的性质。鉴于原子核组成的多体性及核子间核力的复杂性，并没有一个普适的标准模型来研究原子核问题。但是在对原子核基本性质的研究和描述上，人们针对不同的实验现象构建了相应的模型方法，如自洽平均场方法能够很好地描述原子核基态和激发态的性质 [2–5]；大部分原子核的态自旋和宇称都可以使用壳模型而得到非常好地解释，其又可细分为无核/有核壳模型 [6–15]；液滴模型则能在一定程度上解释了原子核的振动、转动及原子核的结合能和裂变等 [16–20]。总之，人们多年来通过核模型的构建很好描述了原子核的结构性质并在一定程度上做出了预测。而在实验方面研究核结构的有效途径是原子核反应，通过对原子碰撞的物理过程研究人们可以获得核子激发谱信息，这些实验信息不仅能对理论模型的预言做出检验，同时也指引了理论模型完善的方向。特别是近年来，随着放射性束流实验装置的发展，实验上发现了一些有别于传统核结构的现象（如传统幻数的消失与新幻数的产生等 [21–26]），这不仅使人们从一个新的角度来认识原子核的结构，同时也促使了天体物理学科（核天体物理）的进一步发展。

1.1 当前核物理研究前沿简介

这一节我们简要地介绍近年来在核物理领域人们较为关注的几个热点问题。

1. 原子核的奇偶差效应

经过一百多年的研究和探索，原子核结构性质的研究已趋于成熟，而在原子核的诸多性质中，原子核的一系列性质都表现出了奇偶差现象，如原子核质量、丰度的奇偶差，能谱的奇偶差及转动惯量的奇偶差等。这是原子核中配对

核子之间对关联存在的各式各样表现中最本质的问题 [1, 27, 28]。原子核质量的奇偶差也是人们最早注意到的对关联现象 [29]。实验表明, 在相邻的原子核中, 偶偶核最稳定, 奇- A 核次之, 奇奇核则最不稳定。而在所有奇奇核中, 除了 ${}^2_1\text{H}_1$, ${}^6_3\text{Li}_3$, ${}^{10}_5\text{B}_5$ 和 ${}^{14}_7\text{N}_7$ 四个最轻的核之外, 都是不稳定的。这说明偶数个核子的配对态最稳定 (自旋 $I = 0$)。1958年, 在Bohr和Mottelson等人对一系列奇偶差实验信息进行系统性分析后指出原子核内有着很强的对关联效应 [30]。这使得对关联在原子核结构的研究中具有非常重要的地位。例如, 在对核物理中的另一个热点问题—超重核区研究中, 对关联如何影响超重核的形变、裂变位垒及转动性质是人们所关注的问题 [31, 32]以及在高自旋同核异构体中的影响 [33]。此外, 对于晕结构形成的影响也是近年来人们研究兴趣的焦点 [34, 35], 例如, 早在1991年, Bertsch和Esbensen意识到对关联的重要性后, 便使用准粒子连续无规相近似 (A Quasiparticle Continuum Random-Phase Approximation(RPA)) 方法, 以 ${}^9\text{Li}$ 为中心核, 在考虑了密度依赖的零程对相互作用后, 他们发现 ${}^{11}\text{Li}$ 有非常明显的中子晕现象, 同时也再现了实验上给出的核物质半径 [36]。同样, 文献 [37, 38]运用Relativistic Hartree-Bogoliubov 模型讨论对关联效应在 ${}^{11}\text{Li}$ 的中子晕现象及 $s - p$ 壳能隙问题中的作用。对奇偶差性质的理论研究是本文主要内容之一, 我们在第三章中通过理论模型的计算讨论奇偶差性质。从理论上来说, 结合能的奇偶差值经常是从平均的Hartree-Fock (HF)+Bardeen-Cooper-Schrieffer(BCS)或者Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB)能隙中推断出来 [39–41], 而不是通过偶核与奇核结合能的实验值差直接计算出来的。然而, 在有些情况中, 平均的HFB能隙与直接通过结合能的实验值计算而得到的奇偶质量差有本质上的不同。因此, 在本文的研究中, 我们讨论的奇偶差值是通过直接计算的方式得到的, 以及与之对应的实验值。通过直接计算的方式获得奇偶差值又有几种方法, 比如, 三点公式法、四点公式法和五点公式法 [39, 42, 43]。我们在本文的第三章中, 则采用了三点公式。此外, 质子/中子的分离能作为原子核的重要性质, 他们对核平均场和对关联的方方面面很敏感。因此, 中子分离能也是我们讨论的内容之一。

正如上文所述, 结合能的奇偶差效应表明奇核的质量大于相邻的两个偶核, 而对关联也与这个效应有关系 [30, 44]。对关联是原子核动力学多方面潜在的一种新兴现象, 也是核平均场外最重要的关联关系。如今, 特别感兴趣的是研究滴线核区的对关联性质, 因为, 在滴线核区, 对能隙比得上核子的分离能, 而且连续效应也可能表现自己。事实证明, 无论是在稳定核中还是在不稳定的核中, 用有效零程对力的HFB方法来研究原子核对关联都是一种可靠的、方便计算的方法, 如文献 [45, 46]中所提到的。因此, 人们开始关心密度依赖的零程对相互作用是如何影响对关联。文献 [4]采用了三种不同的密度依赖对力, 通过BCS和HFB计算系统的比较了结合能奇偶差值的计算值与实验值。然而, 从结果中并没有看出这几种密度依赖对力的重要差别, 但是也发现使用表面型-对力 (the surface-peaked pairing

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.